

# Die Entwicklung des Arbeitsgebietes Physik der Hochatmosphäre am Geophysikalischen Observatorium Collm

Rudolf Schminder

## Zusammenfassung:

Am Geophysikalischen Observatorium Collm, das 1932 als experimentelle Basis des Geophysikalischen Institutes der Universität Leipzig für meteorologische, seismologische und geomagnetische Messungen von Professor LUDWIG WEICKMANN errichtet worden war, wurde 1956 in Vorbereitung des Internationalen Geophysikalischen Jahres (International Geophysical Year [IGY]) mit hochatmosphärischen Messungen begonnen. Seit 1959 liegt der Schwerpunkt auf Windmessungen im Höhenbereich der oberen Mesosphäre / unteren Thermosphäre (80 - 110 km).

Die Meß- und Auswertemethode wurde in den vergangenen Jahrzehnten aus sehr bescheidenen Anfängen heraus theoretisch und experimentell so entwickelt, daß derzeit eine vollautomatische komplexe Apparatur zur quasi-kontinuierlichen Windmessung in drei Referenzpunkten über Mitteleuropa (gegenseitige Entfernung 200 km) zur Verfügung steht, die die Momentanwerte des Windes nach Richtung und Geschwindigkeit mißt, die zugehörige Höhe feststellt, Mittelwerte bildet, Grund- und Gezeitenwind voneinander trennt und Höhen-Wind-Profile über vorgebbare Zeitabschnitte rechnet, aus denen letztendlich Höhen-Zeit-Schnitte der Windfeldparameter konstruiert werden können.

Die vorliegende Arbeit skizziert die einzelnen Etappen dieser Entwicklung, berichtet von Problemen und ihrer Lösung und gibt Beispiele von Windfeldanalysen aus dem Jahre 1992.

## Abstract:

The Collm Geophysical Observatory was founded by Professor L. WEICKMANN in 1932 as an experimental base of Leipzig University's Geophysical Institute for meteorological, seismological and geomagnetic observations. In 1956 as a preparation for the Internal Geophysical Year (IGY) we began with high-atmosphere measurements, and since 1959 wind measurements in the height range of the upper mesosphere / lower thermosphere (80 - 110 km) have been emphasized.

During the past decades the method of measuring and analysing was developped theoretically and experimentally from primitive starts so far, that at present a fully automatic and complex equipment with quasi-continuous measurements of the wind at three reference points within Central Europe (mutual distance 200 km) is available. These devices measure the instantaneous data of the wind according to direction and velocity, ascertain the corresponding height, calculate averages, separate the tidal wind components from the prevailing wind, and compute height-wind-profiles for adjustable periods of time, from which height-time cross section of the wind field parameters can be finally constructed.

The following paper outlines the particular stages of this development, informs about problems and their solution, and offers examples of wind field analyses for 1992.

## 1. Der Beginn

1953, einen Tag vor Heiligabend, hat LUDWIG WEICKMANN, der Direktor des Geophysikalischen Institutes der Universität Leipzig von 1923-45, noch einmal "sein" Observatorium besucht. "Ich danke allen, die für seine Pflege und Erhaltung in schweren Jahren so erfolgreich und mit Hingebung gearbeitet haben und wünsche dem Observatorium alles Gute für die Zukunft zum Besten des Volkes und der Wissenschaft" steht in unserem Gästebuch. Wir haben versucht, sein Vermächtnis zu erfüllen. Nach dem zweiten Weltkrieg mußten die wohlbegründeten Absichten aus den dreißiger Jahren, ein Geophysikalisches Observatorium mit allen nur möglichen Disziplinen der Meteorologie und Geophysik auszustatten, um den Studenten umfassende Bildungsmöglichkeiten zu bieten, fallengelassen werden. Die Spezialisierung mit der Forderung nach immer mehr Aufwand in personeller und materieller Hinsicht machte bei der unausweichlichen Notwendigkeit hinreichenden wissenschaftlichen Tiefgangs eine Beschränkung auf einige wenige Fachgebiete notwendig, wobei an eine modernere Ausstattung der beizubehaltenden Arbeitsrichtungen und an die Neueinrichtung aktueller Forschungsgebiete zu denken war. Routinemessungen aus den Aufgabenbereichen des Meteorologischen Dienstes mußten, falls sie keiner wissenschaftlichen Analyse dienten, eliminiert werden.

Dieses Konzept, ab 1955 mit der Übernahme des Direktorats des Geophysikalischen Institutes durch SCHNEIDER-CARIUS (Einzelvertrag vom 27.5.57, rückwirkend datiert auf den 1.1.55, Antritt Anfang 1956, verstorben 1959) von den Mitarbeitern des Geophysikalischen Observatoriums Collm (GOC) KOCH, ADLUNG und JUNGE in Vorschlag gebracht, führte später zu einem völligen Verzicht auf herkömmliche meteorologische Messungen, einer Hinführung der seismologischen Arbeiten auf einen zeitgemäßen Stand und zur Neuaufnahme von Arbeiten zur Physik der Hochatmosphäre. Die erdmagnetischen Registrierungen wurden als wertvolle Ergänzung zur Beurteilung einzelner Fragen aus dem Gebiet der Physik der Hochatmosphäre angesehen, aber auf dem vorgefundenen Niveau belassen.

Die von großem Engagement getragenen Anstrengungen, die Seismologie in Bahnen zu lenken, die unter der langjährigen Betreuung von TITTEL (seit 1978 zusammen mit WENDT) das GOC zu einer geachteten Forschungseinrichtung auf diesem Gebiet machen sollten, wurden durch mehrmonatige Gastaufenthalte von tschechischen Wissenschaftlern aus Prag (VANEK 1958, 1960, JANSKY 1964/65) sehr gefördert.

Die Arbeiten zur Physik der Hochatmosphäre begannen im Frühjahr 1956 unter dem Aspekt, zu Beginn des Internationalen Geophysikalischen Jahres (IGY) am 1.7.57 eine Mitwirkung auf einem Spezialgebiet zu garantieren, die den Möglichkeiten des GOC angemessen und von aktuellem wissenschaftlichem Interesse war. Da am Observatorium für Ionosphärenforschung in Kühlungsborn bereits seit Kriegsende (anfangs noch in Warnemünde) Absorptionsmessungen an Funkwellen im Langwellenbereich und ab 1954 auch funktechnische Windmessungen im Höhenbereich um 95 km sowie eine Reihe anderer Untersuchungen vornehmlich zur Erkennung von Sonneneruptionseffekten in der Hochatmosphäre (MÖGEL-DELLINGER-Effekte auf 6 MHz, Atmospheric-Registrierungen auf 27 kHz u.a.) liefen, lag es nahe, mit den Kollegen dieses Hauses engen Kontakt zu suchen. Bemühungen von ADLUNG in dieser Richtung führten zu einem ersten Besuch von LAUTER, dem Leiter des Observatoriums Kühlungsborn, am 19.11.55 am GOC.

Am 14.7.56 kam es zu einer Zusammenkunft am GOC, an der, neben SCHNEIDER-

CARIUS (Leipzig) und KOCH (Collm), LAUTER (Kühlungsborn), MRAZEK und TRISKA (Prag) teilnahmen. Es wurde beschlossen, unter dem Gesichtspunkt des Aufbaus eines längeren meridionalen Meßprofils, das später über Ungarn bis nach Bulgarien geführt wurde, Absorptionsmessungen auch am GOC durchzuführen und bis zum Beginn des IGY eine Pilotanlage für Windmessungen nach der KRAUTKRÄMER-MITRA-Methode einzurichten.

Der Anfang war erwartungsgemäß schwer, insbesondere gab es kaum geeignete Vorlagen. Die KRAUTKRÄMER-Methode war im wesentlichen im Kurzwellen(KW)-Bereich eingesetzt worden, und eigene Versuche zeigten sehr bald, daß das erstens in einen Höhenbereich führt (um 150 km und höher), der meteorologisch nicht mehr relevant war, zweitens in diesen Höhen die Mitführung des Tracers (freie Elektronen) mit dem Wind infolge des erdmagnetischen und auch elektrischer Felder nicht mehr in vollem Umfang gewährleistet war und drittens die Unterscheidung zwischen Wind und Wellen Probleme zu bereiten schien. Nach längeren Debatten über echte und unechte Probleme, die bereits die Conference on Physics of the Ionosphere im September 1954 im Cavendish Laboratory in Cambridge belasteten, wurde die damals D1-Methode genannte Meßmethode mehr und mehr in Frage gestellt. Es ist das Verdienst von SPRENGER (Kühlungsborn), das Augenmerk auf den Langwellen(LW oder LF [low frequency])-Bereich gelenkt zu haben, in dem Messungen im Bereich von 80-110 km Höhe zu erwarten waren, so daß sich eine Reihe von Schwierigkeiten a priori behoben. Das GOC hatte von Anfang an wegen unbestreitbarer Vorzüge für die manuellen Windmessungen eine photographische Fadingaufzeichnung gewählt, die später wegen des hohen personellen und materiellen Aufwandes einen heilsamen Zwang zur Automatisierung der Messungen darstellte. Das Verfahren verlangte die Installation eines Meßpunkte-Netzes (später bekamen solche Anlagen den Namen "array") mit etwa 300 Meter Gitterabstand. Das bedeutete hohe Kosten, die u.a. dazu verführten, die Einmessung im Gelände selbst vorzunehmen. Bei einer späteren Erweiterung des Netzes 1972 auf 7 Punkte mußten alle diese ersten Meßpunkte verlegt werden. Die damaligen Rechenmöglichkeiten verlangten zwingend eine Ausrichtung nach N und einen exakten Gitterabstand.

An allen Stellen, bis auf Kühlungsborn, waren Windmessungen dieser Art bisher als eine Art Labormessungen betrieben worden, mehr geeignet, ihre prinzipielle Brauchbarkeit zu zeigen als damit kontinuierliche Messungen durchzuführen. Meteorologische Fragestellungen, die zu ihrer Beantwortung lange Zeitreihen erfordert hätten, spielten bis auf eine Ausnahme noch keine Rolle. Diese Ausnahme bestand in der erstaunlich zeitigen Aufnahme von Versuchen, UKW-Sender (Frequenzen um 100 MHz) mit ihrer Rückstreuung der Wellen an der Unterseite starker Inversionen zu Messungen in der Troposphäre zu verwenden. Am GOC wurden diese Gedanken bereits 1960 mit einer Diplomarbeit (MERTA 1960) aufgegriffen. Mit eigenen Sendern betrieben, wurde das Verfahren sehr viel später mit dem Incoherent-Scatter in den MST-Radar-Anlagen genutzt (M = Mesosphäre, S = Stratosphäre, T = Troposphäre; VHF-Bereich um 50 MHz, UHF-Bereich um 500 MHz und darüber). Abgesehen von dieser Ausnahme liefen die Arbeiten unter dem Begriff Ionosphärenforschung und beachteten mehr die Eigenschaften des Tracers als die damit gegebene Abbildung. Windmessungen auf der Basis anderer Methoden (Ableitung aus tageszeitlichen erdmagnetischen Variationen, photographische Registrierungen der Versetzung von Meteorspuren, Schallausbreitungen) waren ebenfalls zu integral, auf einen zu kleinen Höhenbereich beschränkt, an ganz besondere Bedingungen gebunden (Leuchtende Nachtwolken) oder überhaupt nur als

Existenzbeweise zu verwenden. Die Einführung von funktechnischen Verfahren in bekannte, visuell angelegte Methoden (Meteorbeobachtungen), die Entwicklung wirklich geeigneter neuer funktechnischer Verfahren in nachgewiesener Erprobung und der Einsatz von Raketen, ab 1955 in großen Raketenprogrammen (Raketen-Granaten-Methode, Düpel, Dampfwolken), besonders in den USA, stand noch bevor.

Der Einstieg in ein Programm mit dem Ziel der Durchführung täglicher (wenn auch noch äußerst lückenhafter) Messungen am 1.7.57 wurde realisiert, doch der Probleme wurden nicht weniger. Es galt, die Registriergeräte zu verbessern und die vorhandenen Ansätze für eine Theorie der Analyse zu entwickeln. Alle Geräte, von den Empfängern bis zu den damals benutzten Schleifenoszillographen, wurden zunehmend in eigener Werkstatt gebaut (RAAB, später MORSCH, SCHÖNE), anfangs noch mit Unterstützung der Werkstatt des Geophysikalischen Institutes in der Stephanstraße in Leipzig (Alte Sternwarte; NEUBERT, BOHMANN). Nach zwei Jahren zeigten sich erste Erfolge ab, die im wesentlichen mit dem Auffinden einer brauchbaren Meßstrecke (272 kHz, Sender Topolna bei Brünn) zu tun hatten. Das D1-Verfahren, das noch zu beschreiben sein wird, zeichnet sich u.a. durch die Möglichkeit aus, vorhandene Rundfunksender im Langwellenbereich zu nutzen und damit den Investitionsaufwand auf die Empfangsseite zu beschränken. Die Leitung der Arbeiten hatte ADLUNG, unterstützt im Hinblick auf die Ausarbeitung der Auswerteverfahren von dem Hilfsassistenten KAUTZLEBEN.

## 2. Eine wichtige Entscheidung

Der Verfasser, der 1956 KAUTZLEBEN als Hilfsassistent und 1959 ADLUNG als Assistent ablöste, fand eine wenig zuverlässige Apparatur und so wenige Unterlagen vor, die eine realistische Abschätzung der Chancen der Fortführung der Arbeiten hätten ermöglichen können, daß der Entschluß nahe lag, anderen Forschungsrichtungen den Vorzug zu geben. Es bestand die Absicht, Höhenstrahlungsmessungen auf der Basis der gerade aufgekommenen Neutronenmonitore (mit  $^{10}\text{BF}_3$ -Rohren in Lagen mit Koinzidenzschaltung zur Richtungsabschätzung) vorzunehmen. Eine Zusammenkunft mit MESSERSCHMIDT in Halle im Herbst 1959, zu der sich der Verfasser die Unterstützung von SCHNEIDER-CARIUS gesichert hatte, führte zu der klaren Erkenntnis, daß MESSERSCHMIDT nicht die Absicht hatte, aus dem Forschungsetat für Höhenstrahlungsmessungen, den er gleichzeitig verwaltete und nutzte, auch nur eine Mark abzugeben. So schien es daher geraten, die angefangenen Arbeiten auf dem Gebiet der hochatmosphärischen Windmessungen zielsuchend fortzusetzen. Den Ausschlag hatte wohl letztendlich BERG (Köln) mit einem Kolloquiumsvortrag in Leipzig über die von ihm schon sehr weit vorangedachten Entwicklungen (zu deren Realisierung er größtenteils nicht mehr gekommen ist) und der Kontakt mit FAUST (Offenbach) gegeben.

Der von dem Betroffenen damals sicher als schmerzlich empfundene Umstand, daß 1960 in Leipzig im Fach Meteorologie nicht immatrikuliert wurde und es daher für einen gebürtigen Leipziger kaum eine Alternative zum Warten gab, sollte sich später als einer der glücklichen Zufälle erweisen, die die Arbeiten an einem Observatorium dann über Jahrzehnte prägen können. Er führte im Sommer 1960 den Abiturienten DIERK KÜRSCHNER als Praktikanten an das Observatorium. Sein sofort sichtbares Interesse, gepaart mit guten Schulkenntnissen und Erfahrungen in der Radiobastelei, die damals das Feld war, auf dem sich heute die Computer-Freaks tummeln, ließen ihn sehr schnell Zugang zu unseren Arbeiten finden und führte dazu, daß die Verbindung auch während des sich von 1961-66 anschließenden Physik-Studiums an der Universität Leipzig nicht



ab. Seine Diplomarbeit befaßte sich bereits mit dem Aufbau einer ersten Vorstufe für die heute vollständige Automatisierung unserer Messungen, die 1972 in origineller Weise in der Dissertation ausgebaut und deren Entwicklung bis zum heutigen Tage entsprechend der ständig erweiterten Möglichkeiten insbesondere der elektronischen Datenverarbeitung fortgesetzt wurde. Rückblickend kann man sagen, daß die Zusammenarbeit des Verfassers mit KÜRSCHNER zu einer vollendeten Symbiose in der wissenschaftlichen Arbeit geführt hat, wie sie über mehr als drei Jahrzehnte einem so kleinen "winning team" nur selten zu Teil wird.

### 3. Die Meß- und Auswertemethode

Das Prinzip der hochatmosphärischen Windmessungen beruht auf einer Idee, die ursprünglich von RATCLIFFE und PAWSEY 1933 geäußert, 1935 von PAWSEY konkretisiert und zu Beginn des Krieges von KRAUTKRÄMER in Buschbell bei Köln offenbar erstmalig systematisch in die Praxis umgesetzt wurde, vermutlich nicht ganz ohne die Absicht, die als kriegswichtig eingestuften (und nur 1943 in einem verschollenen Bericht der Zentrale für das wissenschaftliche Berichtswesen der Luftfahrtforschung nachweisbaren) Arbeiten zu nutzen, um einen kleinen Mitarbeiterstamm vor dem Fronteinsatz zu bewahren. Sowjetische Kriegsgefangenschaft und zu späte Veröffentlichung 1950 führten zum Verlust der Priorität, so daß die Methode heute besonders im angelsächsischen Schrifttum mit dem Namen MITRA verknüpft wird, dessen Arbeit 1949 erschien. Sie fußte auf Entwicklungen, die unmittelbar nach dem Krieg in England 1947 auf Anregung von RATCLIFFE in Cambridge wieder aufgenommen worden waren. Gleichzeitig hatte BRIGGS 1950 im selben Hause die elegante Theorie der "full correlation analysis" für die Interpretation der Messungen zu entwickeln begonnen und wenig später (1955) PHILLIPS die erste brauchbare Automatisierungsvariante vorgeschlagen.

Wir wollen an dieser Stelle auf allzu spezifische Details verzichten und die Methode in Form einer Analogie erläutern: Ein Beobachter, der bei sonnigem Wetter auf einem Berggipfel den Wolkenzug beobachtet, kann im Vorland die Wolkenschatten über Wiesen und Felder wandern sehen. Stellt man (minimal) drei Personen so im Vorland auf, daß sie nicht gerade in einer Linie stehen, so läßt sich aus den Zeitdifferenzen zwischen den Durchgängen der Schattengrenzen durch diese Beobachtungspunkte, die die Personen mit zu einem festen Zeitpunkt gestarteten Stoppuhren erfassen könnten, bei Kenntnis der Geometrie des Meßdreiecks der Schatten- und damit auch der Wolkenzug nach Richtung und Geschwindigkeit bestimmen. Nimmt man an, daß sich die Wolken mit dem Wind bewegen und Form und Größe während der Zeit, in der ihre Schatten auf der Erdoberfläche zur Messung benutzt werden, nicht wesentlich verformen, so ist die Luftbewegung abschätzbar. Natürlich können nur solche Wolken zur Messung verwendet werden, deren Schatten alle Meßpunkte des Dreiecks erreichen, und es ist vorstellbar, daß die Messungen mit Wolken, die im horizontalen Querschnitt der Kreisform nahekommen, die geringsten Schwierigkeiten machen werden.

In unserem Fall sind die Sonne durch Sender (einen oder mehrere), die Wasserwolken durch Elektronenwolken, die Schatten auf der Erdoberfläche durch Feldstärkemuster, Amplitudenmuster genannt und gebildet aus dem im Referenzpunkt reflektierten Signal, und die Beobachter durch Funkempfänger ersetzt. Die Elektronenwolken gehören zu einer Strukturierung des hochatmosphärischen Plasmas, von der meist nur die herausgehobenen Schichten (E-Schicht [KENNELLY-HEAVISIDE-Schicht], F-Schicht [AP-

PLETON-Schicht]) bekannt sind. Wir haben für die Elektronendichte  $N$  ungeachtet dessen, daß  $N$  im wesentlichen eine Funktion der Höhe  $h$  und der Zeit  $t$  ist, in jedem Niveau mit kleinräumiger Variabilität zu rechnen, die letztendlich zu einer rauen Reflexionsfläche führt.

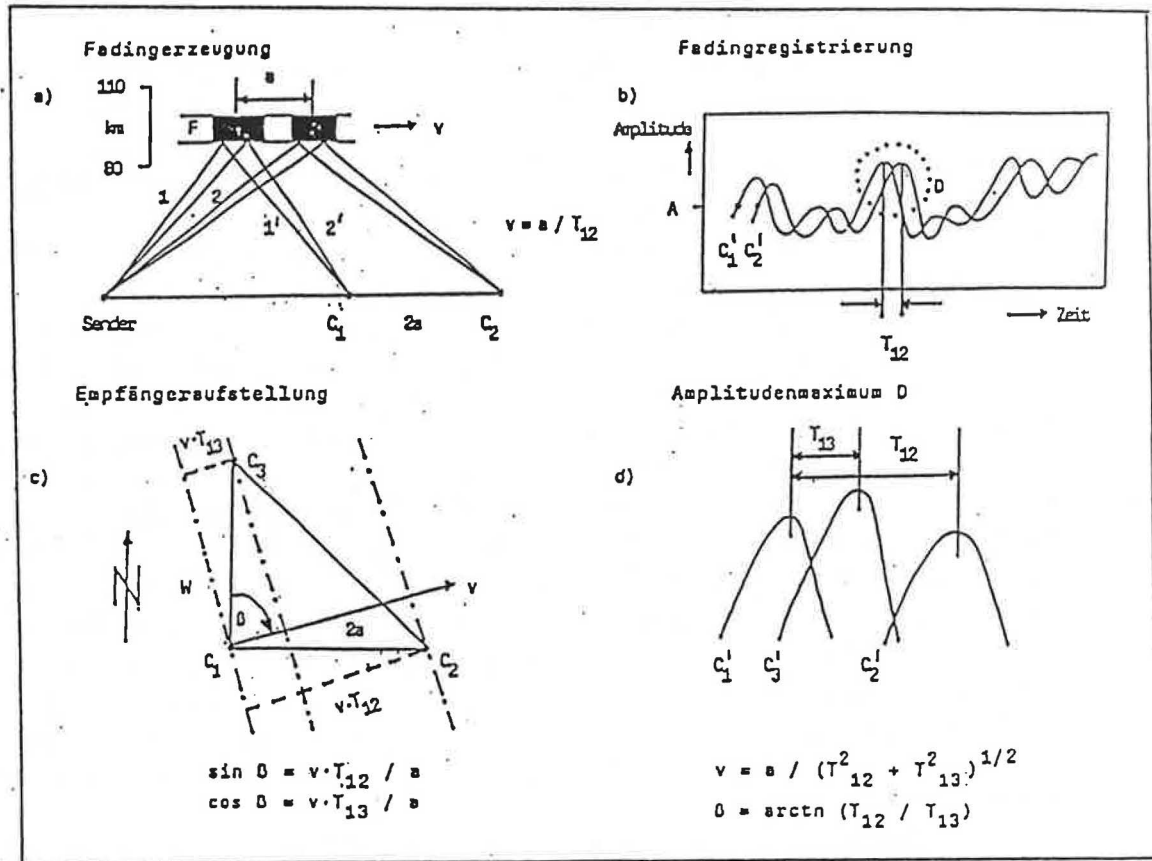


Abb. 1: Zur Erläuterung des "closely-spaced-receiver"-Meßverfahrens und der "similar-fades"-Auswertemethode für LW-Windmessungen in der Hochatmosphäre.

Betrachten wir in Abb. 1a einen von dem Sender S ausgehenden primären Funkstrahl 1, so wird die Reflexion an der rauen Unterseite der ersten schwarz markierten Struktur zur Bildung eines ganzen Bündels von Sekundärstrahlen führen, deren Phasen und Amplituden völlig zufällig verteilt sind. Ein Strahl (1') aus diesem Bündel erreiche den Empfänger in C<sub>1</sub>. Für einen zweiten Primärstrahl 2 gelte dasselbe. Die erste schwarz markierte Struktur ist gerade so groß gezeichnet, daß alle von ihr reflektierten Primärstrahlen noch einen Sekundärstrahl zum Meßpunkt C<sub>1</sub> schicken können. Wir haben nicht die Bündel, wohl aber die beiden Sekundärstrahlen 1' und 2' in Abb. 1a eingetragen. Viele solche Sekundärstrahlen, die alle untereinander interferenzfähig sind, überlagern sich zu einer Resultierenden, die in Abb. 1b auf der Kurve C<sub>1</sub> durch einen Punkt in der Höhe A auf der Ordinate markiert ist.

In der Zeichenebene mit dem Wind mitbewegte in der Fläche F nachfolgende Strukturen werden zu anderen Resultierenden, größeren, kleineren oder auch gleichen, führen, und somit am Empfängerausgang des Punktes C<sub>1</sub> eine Spannungsvariation entstehen lassen, die wir in Abb. 1b in der Kurve C<sub>1</sub> wiedergegeben haben. Man nennt diese Variation

ein Fading, und der zugrundeliegende Prozeß ist einer von vielen Prozessen, die zu einem Fading führen können.

Nimmt man nun an, daß sich die betrachtete, als schwarzer Block gezeichnete Elektronendichtestruktur unverformt mit der Geschwindigkeit  $v$  über die Strecke  $a$  bewegt (Abb. 1a), so wird nach einer Zeit  $T_{12} = a/v$  dasselbe Fading am Meßpunkt  $C_2$  ablaufen und das Aussehen von  $C'_2$  in Abb. 1b haben.

Weht der Wind nicht gerade zufällig in Richtung der Punkte  $C_1C_2$ , so benötigt man eine 3-Punkt-Aufstellung nach Abb. 1c. Nimmt man an, daß sich das Amplitudenmaximum  $D$  aus Abb. 1b über die Empfangsanordnung  $C_1C_2C_3$  bewegt, so lassen sich die zur Berechnung von Windrichtung  $\beta$  und Windgeschwindigkeit  $v$  benötigten Zeitdifferenzen  $T_{12}$  und  $T_{13}$  aus Abb. 1d gewinnen.

Damit ist das Grundschema der sogenannten "closely spaced receiver"-Aufstellung bei Auswertung nach der "similar fades"-Methode skizziert. Eine nähere Untersuchung der Verhältnisse hat, so einfach das Prinzip auch scheinen mag, eine Vielzahl von Problemen ans Licht gebracht, die, heute vielfach gelöst oder vergessen, zu ihrer Zeit als philosophische Kategorien gehandelt wurden. Drei Überlegungen drängen sich auf: Die Bewegung der Ladungsträgerdichtestrukturen über die Strecke  $a$  in Abb. 1a kann kaum ohne eine Verformung verlaufen. Für die Verformung müßte schon die Turbulenz sorgen, die zu einer Streuung der über ein gewisses Mittelungsintervall aufgenommenen Zeitdifferenzen und somit auch zu einem Verlust der Identität der in Abb. 1b nur als zeitverschoben angesehenen Fadingabläufe  $C'_1$  und  $C'_2$  führen sollte. Das bringt uns unmittelbar zu der Überlegung, daß man zur Gewinnung von Geschwindigkeitsmittelwerten  $\bar{v}$  nicht von den mittleren Zeitdifferenzenwerten  $\bar{T}$  ausgehen darf. Im Extremfall völliger Turbulenz und vernachlässigbarer Translation ergäbe sich nämlich aus  $\Sigma T = 0$  ein  $v = a/\bar{T} = \infty$  anstelle von  $v = 0$ , ein sehr ungewolltes Ergebnis und dabei, wie aus der Literatur hervorgeht, gar nicht so offensichtlich, wie man annehmen möchte.

Nun liegt aber natürlich die Schlußfolgerung nahe, daß in dem Verlust an Identität zwischen den Fadingverläufen  $C'_1$ ,  $C'_2$  und  $C'_3$  eine Information über die Turbulenz steckt, und daß der Zugang dazu über einen Wert  $v' = a/\bar{T}$  zu finden sein sollte, wenn man den singulären Punkt  $\Sigma T = 0$  ausschließt. Tatsächlich haben Untersuchungen gezeigt, daß man eine Größe  $v_e = v \sqrt{((v'/v) - 1)}$  gewinnen kann, meist als "chaotic velocity" bezeichnet, die nach nicht ganz einheitlicher Auffassung der Turbulenz proportional sein müßte. Auf jeden Fall ist bei  $v' = v$  das  $v_e = 0$ . Wir benutzen das  $v_e$  als Gewichtungsfaktor für die Bewertung der gemessenen  $v$  bei weiterführenden Analysen. Das zweite Problem betrifft die Voraussetzung der Orthogonalität von Wellenfront und Windrichtung in Abb. 1c. Sie ist nur bei völlig isotropen Amplitudenmustern gegeben. Bei in der Regel anzunehmender Anisotropie der Amplitudenmuster (hier spielt das Erdmagnetfeld eine Rolle; in niederen Breiten ist die Verzerrung in meridionaler Richtung so groß, daß man mitunter nur die Zonalkomponente des Windes befriedigend messen konnte) ergeben sich von  $90^\circ$  abweichende Winkel  $\delta$  und die gemessene Windgeschwindigkeit  $v$  wird um den Wert  $v(1 - \cos \delta)$  zu klein. PÜTTER hat 1955 auf der schon genannten Konferenz in Cambridge Gedanken über eine mögliche Abhilfe vorgetragen und damit einem vermutlich so gar nicht existierenden Sachverhalt seinen Namen gegeben: Wenn die nacheinander über die Empfängeraufstellung hinwegziehenden, durch Ellipsen anzunähernden Amplitudenmuster alle eine verschiedene Orientierung hätten, so würden alle gemessenen Windvektoren  $v_p$  auf dem Kreisumfang über der wahren Windgeschwindigkeit  $v$  als Durchmesser liegen (PÜTTER-Kreis). Bei Gleich-

verteilung der Winkel (das schließt eigentlich schon die Richtwirkung des Erdmagnetfeldes aus) ergäbe sich  $v = 3v_p/2$ , bei Verteilung nach einem Exponentialgesetz, etwa nach  $\exp(-tg^2\delta)$ , würde  $v = 2v_p$ . Ein Ausgleich der Einzelmessungen nach einem Kreisumfang brächte dann die Lösung. Da das praktisch besonders in der Vor-Computerzeit beträchtliche Schwierigkeiten gemacht hätte, hat PÜTTER noch gezeigt, daß ein Ausgleich der einzelnen Zeitvektoren  $T$  nach einer Geraden denselben Zweck erfüllt. In der Praxis und auch nach unseren Analysen mit einem umfangreichen Datenmaterial, gerechnet mit der noch zu besprechenden vollständigen Korrelationsanalyse auf dem ZRA1 des Organisations- und Rechenzentrums der Universität Leipzig in den sechziger Jahren, (1979 haben wir dann den ersten eigenen Rechner installiert, 1986 begann für uns das Zeitalter der Mikroelektronik) hat sich gezeigt, daß die elongierten Amplitudenmuster eine ziemlich enge Richtungsverteilung aufweisen, so daß für den Ausgleich nur ein sehr geringes Umfangstück des Kreises zur Verfügung stünde. Immerhin haben beide Probleme dazu geführt, Analyseverfahren zu beachten, die über die bloße Zeitdifferenzenablesung an Extremwerten der Fadingverläufe hinausgehen.

Das dritte Problem ist von etwas anderer Natur. Messungen der vorgestellten Art lassen ohne zusätzliche Kenntnisse prinzipiell nicht zwischen Windbewegungen und Wellen unterscheiden. Um bei dem bereits benutzten Analogon zu bleiben: Der Betrachter auf dem Berggipfel kann nicht unterscheiden, ob die beobachtete Bewegung der Halme an der Oberfläche eines Kornfeldes von Wellenbewegungen herrührt, deren Ursache unbekannt sein könnte, oder ob sich das Feld über die Unterlage bewegt. Die Entscheidung wird durch zusätzliches Wissen über die Natur eines Kornfeldes geliefert. Im vorliegenden Fall könnte die Entscheidung aus einer feststellbaren Dispersion kommen. Läßt sich eine Dispersion, also eine Abhängigkeit der Geschwindigkeit  $v$  von der Fadingperiode finden, dann spräche das zumindest für Wellenanteile. Diesem Gedanken ist eine Zeitlang, ausgehend von Arbeiten von JONES & MAUDE, intensiv nachgegangen worden, und natürlich wurde auch eine Dispersion gefunden. Später konnte dann an Hand von Modellrechnungen mit den nunmehr zur Verfügung stehenden Rechenmöglichkeiten gezeigt werden, daß sich die gefundene scheinbare Dispersion durch eine Änderung der Windgeschwindigkeit  $v$  während des Mittelungszeitraumes zwanglos erklären läßt. Heute ist das kein Thema mehr: Wellenbewegungen werden besser aus Zeitdifferenzen in den Windvariationen an drei oder mehr Reflexionspunkten der eingesetzten Sender abgeleitet, und sie dürften immer dann existieren, wenn sich auch tatsächlich eine Phasengeschwindigkeit und eine Ausbreitungsrichtung bestimmen läßt. Windvariationen auf einer einzelnen Meßstrecke, auch wenn sie in den erwarteten Periodenbereich fallen, unbesehen als interne Schwerewellen zu interpretieren, ist unzulässig!

Die ersten beiden Probleme (Verformung des Amplitudenmusters und Schiefe der Wellenfront) lassen sich durch ein Verfahren lösen, das unter dem oben genannten Namen "vollständige Korrelationsanalyse" ([temporal] full correlation analysis) bekanntgeworden ist. Es bestimmt die erforderlichen mittleren Zeitdifferenzen  $T$  nicht aus der Betrachtung individueller Fadingextrema, sondern aus der Berechnung der Kreuzkorrelationsfunktionen zwischen je zwei Fadingverläufen über ein vorgegebenes Integrationsintervall. Die Kreuzkorrelationsfunktion entsteht aus der Berechnung von Kreuzkorrelationskoeffizienten unter fortlaufender Verschiebung beispielsweise der Funktion  $C'_2$  gegen die Funktion  $C'_1$  aus Bild 1b auf einem festen Zeitraster. Das Maximum der Kreuzkorrelationsfunktion liefert dann ersichtlich das gesuchte  $T$ . Unter Zuhilfenahme der ebenso berechenbaren Autokorrelationsfunktionen aller Fadingregistrierungen (die



theoretisch bei völlig stochastischem Fading identisch sein sollten, in der Praxis aber unterschiedlich sind und gemittelt werden müssen), lassen sich dann tatsächlich der wahre Windvektor über die Tangente an das elliptische Amplitudenmuster (die sogenannte Korrelationsellipse) und zusätzlich die "chaotic velocity"  $v_c$  ableiten. Darüberhinaus kann man Angaben über die Orientierung der Korrelationsellipse und die Größen ihrer beiden Achsen machen. Voraussetzung ist, daß für den Außenrand der Ellipse ein bestimmter Wert der Autokorrelationsfunktion vorgegeben wird. Meist wird 0.5 oder  $e^{-0.5} = 0.61$  benutzt. Die erhaltenen Strukturparameter beziehen sich dann auf die Ladungsträgerdichtestrukturen im Reflexionsniveau. Ihre Interpretation läuft, um wieder in unserem Bilde des Beobachters auf dem Berggipfel zu bleiben, auf die Beantwortung der Frage hinaus, welche Stelle am Berghang man wählen sollte, um seine Grundfläche zu bestimmen. Ein zu hoch gelegter Ansatz schneidet nur die Kuppe ab, ein zu tiefer bezieht dagegen das Umland mit ein.

Später ist die Methode um die "spatial full correlation analysis" ergänzt worden. Hier wird die Ableitung der Windbewegung und der Strukturgrößen nicht aus der zeitlichen Analyse vieler über die Empfangsanlage wandernder Amplitudenmuster, sondern durch gleichzeitige Ausmessung eines Amplitudenmusters in einem großflächigen Array zu zwei eng benachbarten Zeitpunkten vorgenommen. Das Verfahren bietet theoretisch einige Vorteile, ist aber im LW-Bereich auf Grund des hohen Flächenbedarfes nicht einsetzbar und auch im KW-Bereich bis auf Ausnahmen kaum benutzt worden.

Die Alternative Korrelationsanalyse - "similar fade"- Methode hat in der Folgezeit teilweise heftige Debatten ausgelöst, die, wenn man BURKE (persönliche Mitteilung) glauben darf, um 1970 bis zu Publikationsverweigerungen führten. Sie litten offenbar etwas an der Unterstellung, daß die damals infolge unabdingbaren Computereinsatzes nicht von allen Einrichtungen anwendbare Korrelationsanalyse als das non plus ultra und die "similar fades"- Methode als das Mittel des armen Mannes galt, wobei alle anderen Argumente in den Bereich der Fabel vom Fuchs und den Weintrauben verwiesen wurden. Tatsächlich gibt es durchaus Gesichtspunkte, die neben der unbestritten sehr viel größeren Einfachheit und Robustheit die "similar fades"- Methode vorteilhaft erscheinen lassen, insbesondere im Hinblick auf die Heraushebung des winderzeugten Fadings, die bei der Korrelationsanalyse beispielsweise im Langwellenbereich eine schwer zu handhabende Filtertechnik (mathematische oder technische Filter) notwendig macht, da sonst das langperiodische Fading anderer Entstehung (Polarisationsfading u.ä.) das Ergebnis dominiert. Inzwischen ist die Frage der Rechenmöglichkeiten schon lange kein Gesichtspunkt mehr und die Wahl der Methode wird durch andere Faktoren bestimmt. Eine Rolle spielt beispielsweise, daß die Bestimmung der Strukturparameter ganz in den Hintergrund getreten ist. Unabdingbar wird die Korrelationsanalyse aber dann, wenn aus der komplexen Autokorrelationsfunktion eine Ableitung der sonst unzugänglichen vertikalen Windkomponente angestrebt wird. Eine Ausweitung des Verfahrens in dieser Richtung wird am Institut für Atmosphärenphysik in Kühlungsborn (HOFFMANN 1991) vorbereitet. Am Observatorium Collm wird die "similar fades"- Methode in einer speziellen Form verwendet, die eine vollständige Automatisierung bis hin zur Bildschirmwiedergabe der momentanen Höhen-Wind-Verteilung zuläßt.

#### 4. Die Meßanlage am Observatorium Collm

1972 wurde das 1956 aufgebaute Meßdreieck auf 7 Punkte erweitert, in einer Form (Abb. 2, Lageplan GOC mit Array N-V-W-M-B-E-C), die eine Reihe verschieden großer Dreiecke zu bilden gestattet. Das war insofern von Bedeutung, als der Meßpunkt-Abstand stets ein Kompromiß ist zwischen der Forderung nach großem Abstand zur

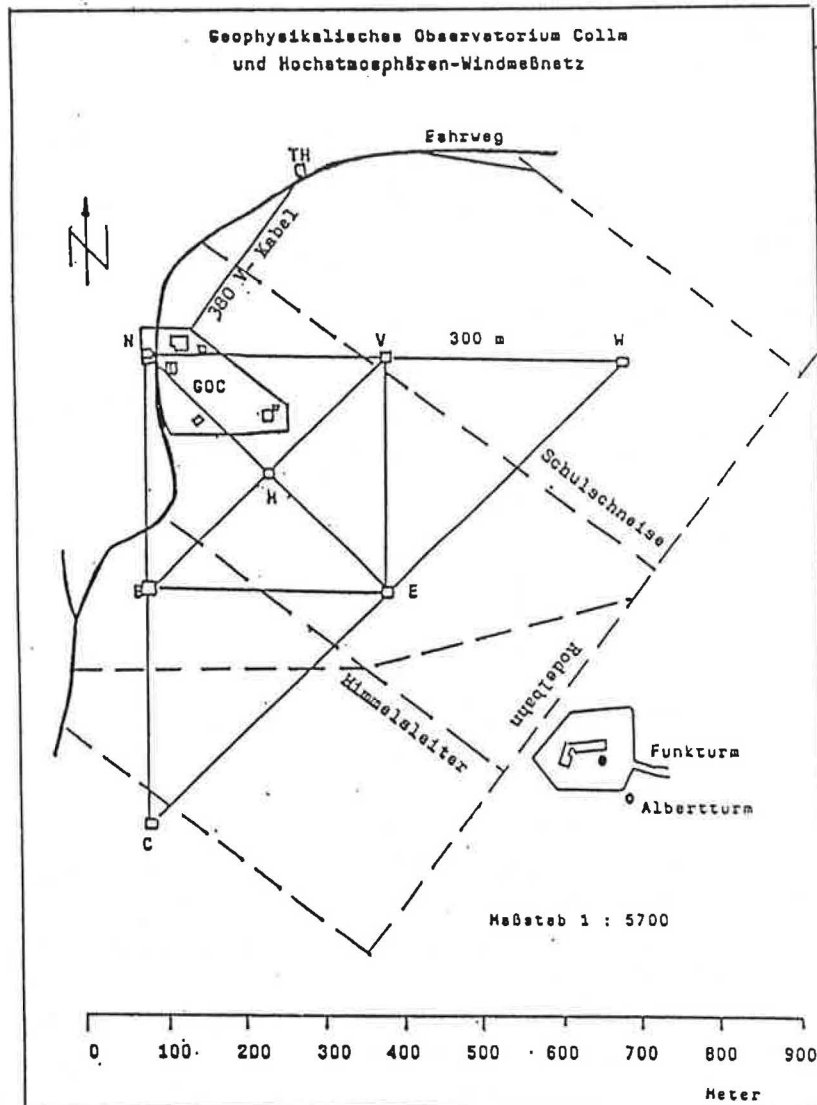


Abb. 2 : Lageplan des Geophysikalischen Observatoriums Collm (GOC)

Vergrößerung der Zeitdifferenzen mit dem Ziel sicherer Bestimmung und Verringerung des relativen Fehlers und der Bewahrung hinreichender Ähnlichkeit der Fadingverläufe, die bei zu großem Abstand infolge der Verformung der Ladungsträgerdichtestrukturen im Reflexionsniveau irgendwann verloren geht. Außerdem muß verständlicherweise die Größe der Zeitdifferenzen deutlich unter der Fadingrate bleiben, und die Fadingrate hängt wiederum von der Arbeitsfrequenz ab. Eine optimale Meßanlage sollte daher wechselnden Anforderungen genügen und ein breites Testfeld offenhalten. Wir finden diese Überlegung auch bei den großen MST-Radar-Anlagen wieder, die, falls mit einem

Modus gefahren, der der hier betrachteten "closely spaced receiver" - Methode entspricht, in diesem Punkt besonders große Variationsmöglichkeiten bieten.

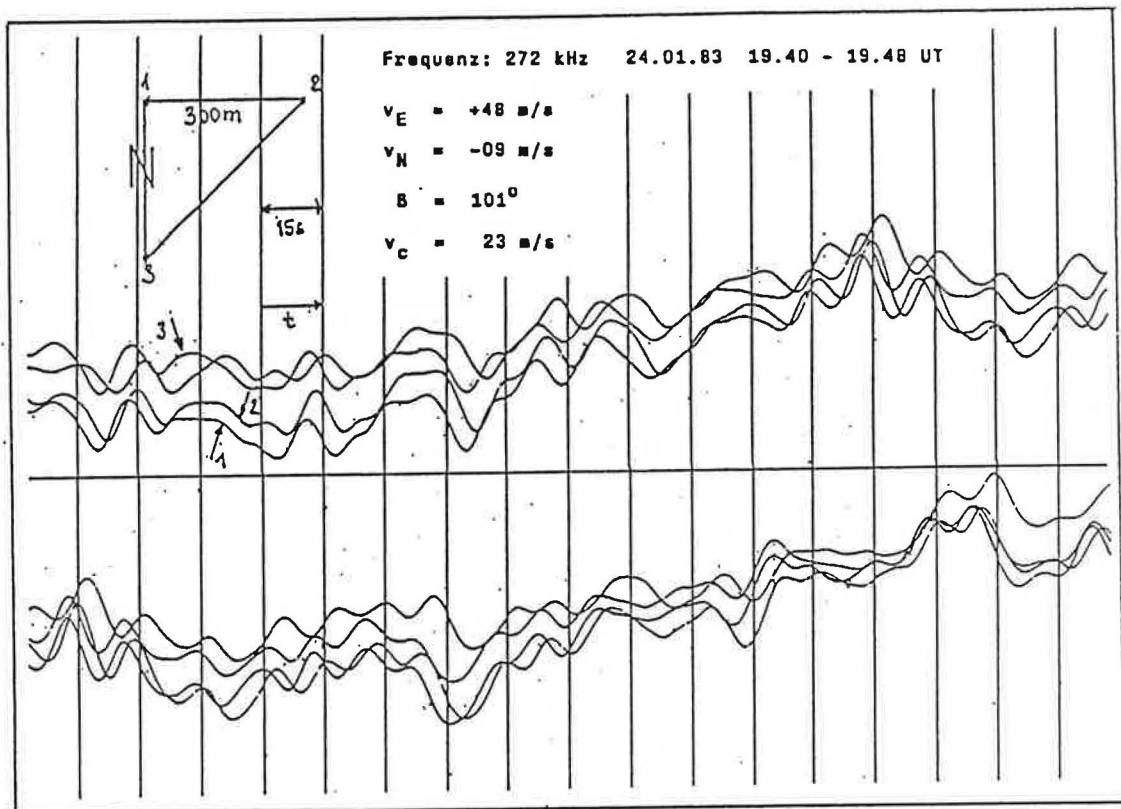


Abb. 3: Beispiel einer Fadingregistrierung auf 272 kHz über 400 km (Sender Topolna, Tschechische Republik) mit Angabe der abgeleiteten Windfeldparameter.

Am GOC werden derzeit Messungen auf 177 kHz (Standort: Zehlendorf bei Berlin; Entfernung: 170 km), 225 kHz (Standort: Plock an der Weichsel; Entfernung 460 km) und 270 kHz (Standort: Topolna bei Brünn; Entfernung: 400 km) durchgeführt. Fadingregistrierungen der eingangs beschriebenen Art dienen nur noch Kontrollzwecken. Abb. 3 zeigt einen Ausschnitt einer solchen Registrierung auf 272 kHz (die Frequenzen der LW-Sender wurden in den achtziger Jahren um 2 kHz vermindert) mit insgesamt vier Fadingspuren, wobei die vierte zu einem zur Sicherheit mitregistrierten vierten Meßpunkt gehört. Eingetragen sind die berechneten Mittelwerte für die zonale ( $v_E$ ) und meridionale ( $v_N$ ) Geschwindigkeitskomponente für das Halbstundenintervall, aus dem die Abbildung nur einen Ausschnitt von etwa 9 Minuten zeigt, die Azimutrichtung  $B$ , in die die Bewegung geht ("Driftrichtung"), und das bereits erwähnte  $v_c$ .

Dieses Registrierverfahren, als Standardverfahren für auch nur annähernd kontinuierliche Messungen unter meteorologischen Gesichtspunkten viel zu aufwendig, wurde bereits 1973 mit der Inbetriebnahme einer voll einsatzfähigen automatischen Anlage verlassen. Das führte unmittelbar zu einer eindrucksvollen Reduzierung des Arbeitsaufwandes und zu einer Steigerung der Meßdichte in einen Bereich hinein, der zum ersten Mal die Messungen aus dem Stadium von Stichpunktmessungen herausführte. In der Folgezeit wurde etwa alle 5 Jahre ein wesentlicher Durchbruch in Richtung auf Automatisierung und Einsatz rechentechnischer Hilfsmittel (1979 mit der Aufstellung von zwei C8505-

Trommelspeicherrechnern, 1986 mit den ersten Kleincomputern und 1990 mit 386-PC) erreicht. Heute sorgt im aktuellen Meßbetrieb eine komplexe automatische Meßanlage am Zentralpunkt N (Abb. 2) nach einem geeigneten Signaldebugging für eine elektronische Differenzierung der Eingangsspannungen und die Feststellung der Zeitdifferenzen zwischen jeweils zwei Fadingverläufen an Hand der Maxima und Minima, die Nulldurchgänge im differenzierten Signal liefern. Von entscheidender Bedeutung war die Realisierung eines Algorithmus', der korrespondierende Extrema in den Fadingverläufen erkennt und im Sinne der Windfadinganalyse nicht interpretierbare Fadingintervalle unterdrückt. Dieser zentrale Baustein der Anlage ist über Jahre verbessert und den Erfordernissen immer besser angepaßt worden.

Die Wertetripel, bestehend aus den beiden über eine vorgebbare Integrationszeit gemittelten horizontalen Geschwindigkeitskomponenten und der Höhe, werden auf einen Monitor gegeben, der während des täglichen Meßzeitraumes von 12 - 12 Uhr das Bild des mittleren Tagesganges langsam aufbaut, und außerdem über einen Drucker ausgegeben und auf Diskette abgespeichert. Am Ende des festgelegten Tageszeitraumes wird eine Reihe von Analysen angeschlossen, die sich mit den Meßwerten eines Tages durchführen lassen und diesen charakterisieren können. Das auf Diskette gespeicherte Datenmaterial steht dann später zu Monatsanalysen und weiterführenden Untersuchungen zur Verfügung.

Das Problem der Messung der zu jedem Windwert zuzuordnenden Reflexionshöhe als Bezugshöhe bot besondere Schwierigkeiten. Da wir mit Fremdsendern arbeiten, kamen die bekannten Methoden aus der Ionosondentechnik, Frequenzsweepverfahren wie bei den partiellen Reflexionen oder interferometrische Verfahren wie bei den Radarmeteor-messungen nicht in Frage. Ein Phasenvergleich zwischen Raum- und Bodenwelle des Trägers, wie er aus Phasen-Höhen-Messungen (v. COSSART 1976) geläufig ist, schied wegen der Notwendigkeit, zur absoluten Höhenbestimmung zwei Sender unter eng begrenzten Bedingungen benutzen zu müssen, aus. Selbst Höhenänderungsmessungen mit einem Sender, die zeitweise versucht worden waren, erwiesen sich wegen der fehlenden Möglichkeit, die Phasendurchläufe (Wellenlänge um 2 km) exakt zu zählen, als unbrauchbar. Als Ausweg erwies sich 1981 eine Idee von KÜRSCHNER, einen engen Frequenzbereich aus dem gut belegten Modulationsspektrum bei 1.8 kHz zu verwenden. Man kommt damit auf eine fiktive Wellenlänge von fast 170 km und bleibt bei Höhenänderungen mit Sicherheit innerhalb einer Phasenlänge. Die nicht einfache Realisierung dieser Überlegung, die bei einer gewünschten Genauigkeit von 1 km Höhenauflösung eine Messung der Phasenwinkeldifferenz auf 3° verlangt, bildete dann ab dem Beginn der achtziger Jahre die Grundlage zur Berechnung von Höhen-Wind-Profilen mit allen daraus erwachsenen Konsequenzen.

Ignoriert man die Änderungen der Reflexionshöhe über den tageszeitlichen Meßzeitraum und ordnet man den Windwerten eine mittlere Höhe zu, die in der Mehrzahl der Fälle im Höhenbereich von 90-100 km liegt, so läßt sich mit einer einfachen Regressionsanalyse der in erster Linie nur jahreszeitlich veränderliche Grundwind von den tagesperiodischen Windkomponenten trennen und dieser mittleren Höhe zuordnen. Das Verfahren gewinnt an Effizienz, wenn man Angaben über die Polarisierung der Gezeitenwindanteile machen und dann beide horizontalen Windfeldkomponenten einem gemeinsamen Ausgleich unterziehen kann (Vektoranalyseverfahren). Tatsächlich darf man in mittleren Breiten im Rahmen der erzielbaren Meßgenauigkeit mit rechtszirkular polarisierten Tiden rechnen. Das so von KÜRSCHNER um 1983 entwickelte Vektoranalyseverfahren ist unseres Erachtens neu und unter gut bedachten Umständen sehr vorteilhaft.



Im Gegensatz zu den Windmessungen mit partiellen Reflexionen, bei denen man die Bezugshöhe aus einem Frequenzsweep mit Überlagerung von gesendetem und empfan- genem Signal (in Juliusruh beispielsweise mit 542 kHz/s) aktiv bestimmen kann, läßt die im LW-Bereich genutzte Totalreflexion keinen gezielten Zugriff auf eine bestimmte Rasterhöhe zu. Wir müssen zur Gewinnung von Höhenprofilen davon ausgehen, daß in einem Zeitraum, der eine Woche nicht unterschreiten sollte, infolge der Variabilität der Elektronendichteprofile alle im Intervall liegenden Höhen mit einer hinreichenden Wertebelegung angeboten werden. In Berücksichtigung dieser Umstände basieren unsere Höhen-Zeit-Schnitte der Windfeldparameter (zonales und meridionales Grundwindfeld, Phase und Amplitude des halbtägigen Gezeitenwindes) einschließlich der Aussagen über die ganztägige Gezeitenwindkomponente in der am dichtesten belegten Schwerpunkt- höhe, auf Halbmonats-Höhen-Windprofilen. Dieses feste Zeitraster wird nur dann verlassen, wenn ersichtlich ist, daß jahreszeitliche Windfeldänderungen oder Windfeld- störungen in Zusammenhang mit etwa den SCHERHAGschen winterlichen Stratosphä- renerwärmungen eine andere Intervallbildung sinnvoll erscheinen lassen.

Die Berechnung der Höhen-Wind-Profile erfolgt in der Regel nach dem Vektoranalyse- verfahren als multiple Regressionsanalyse mit höhenabhängigen Koeffizienten, kon- trolliert durch ständige Mitführung der Einzelkomponentenanalysen. Das Verfahren bietet auf modernen Rechenanlagen keinerlei Schwierigkeiten und beinhaltet im Kern die Lösung eines linearen Gleichungssystems aus  $2(p+1)(q+1)$  Gleichungen, wobei  $p$  die Anzahl der Harmonischen und  $q$  der Grad des Höhenausgleichs ist. Bei ganz- und halbtägiger Gezeitenwindkomponente, Einbeziehung der bekannten quasi-zweitägigen Variation und kubischem Höhenausgleich ergibt sich so ein System mit 32 Gleichungen, das im Winter für einen Halbmonat mit etwa 500-600 Halbstundenmittelwerten für das Höhe-Wind-Tripel durchgerechnet werden muß. Eine ausführliche Darstellung des Verfahrens findet sich in SCHMINDER & KÜRSCHNER (1990). Hier sei nur der Ansatz für die beiden horizontalen Windkomponenten  $v_z(t,h)$  und  $v_m(t,h)$  angegeben, wobei  $z$  der Index für die Zonalkomponente,  $m$  der Index für die Meridionalkomponen- te,  $h$  die Höhe,  $t$  die Zeit und  $\omega$  die Kreisfrequenz der Harmonischen (Gezeitenwind- anteile) sind. Die  $a_{ok}$  beschreiben den Grundwind und die  $b_j$  und  $c_j$  die Gezeiten- windkomponenten:

$$v_z(t,h) = \sum a_{okz} h^k + \sum ( \sum b_j h^k \sin \omega_j t + \sum c_j h^k \cos \omega_j t )$$

$$v_m(t,h) = \sum a_{okm} h^k + \sum ( \sum b_j h^k \cos \omega_j t - \sum c_j h^k \sin \omega_j t )$$

Die zweite Summe jeder Zeile läuft von  $j = 1$  bis  $p$ , alle anderen Summen laufen von  $k = 0$  bis  $q$ . Der Vektoransatz wird darin ersichtlich, daß in den Gleichungen für die beiden horizontalen Windkomponenten dieselben Koeffizienten  $b_j$  und  $c_j$  vorkommen, nur mit verschiedenem Vorzeichen und anderer Zuordnung zu den Winkelfunktionen. Die Höhe  $h$  muß aus der direkt gemessenen "scheinbaren" Höhe  $h'$  durch einen halbem- pirischen Ansatz über die Retardierung des Signals im ionosphärischen Plasma gefunden werden. Wir wollen auf diese recht komplizierte Frage, die aus der Abweichung der Gruppengeschwindigkeit von der Phasengeschwindigkeit im Falle von Dispersion herrührt, nicht näher eingehen.

## 5. Ergebnisse

Seit 1990 wird versucht, den Höhenraum für die Höhen-Zeit-Schnitte zu erweitern und die zeitliche Belegung durch Meßwerte zu verbessern. Ideale Bedingungen bietet dazu die Einbeziehung der Winddaten aus partiellen Reflexionen am Observatorium Juliusruh des schon genannten Institutes für Atmosphärenphysik (IAP) an der Universität Rostock in Kühlungsborn, da die Messungen mit unserem LF-Windprofiler die Nachtzeit und den Höhenbereich von 80-110 km, die MF-Radarmessungen in Juliusruh dagegen die Tagesstunden und den Höhenbereich von 70-95 km umfassen, so daß eine zeitliche und räumliche Überlappung gegeben ist. Dazu kommt, daß auf Grund der traditionell sehr engen Zusammenarbeit mit dem IAP die Möglichkeit besteht, zur Bildung von Höhen-Wind-Profilen auf die anderenorts meist notwendige Aneinanderheftung separat gerechneter Profile mit allen daraus resultierenden Problemen der Anschlußstellen zu verzichten und das Gesamtmaterial einer gemeinsamen Regressionsanalyse mit einem Programm zu unterziehen. Ein Beispiel zeigen die Abb. 4(a-d) mit den Höhen-Zeit-Schnitten für 1992, wobei wegen der erwähnten Voraussetzung rechtszirkularer Polarisation für die halbtägige Tide nur die zonale Phase und Amplitude wiedergegeben werden muß: die meridionale Phase liegt 3 Stunden früher und die meridionale Amplitude ist von gleicher Größe wie die zonale. Die Phasenwerte in Abb. 4c geben den Zeitpunkt des Maximums der Bewegung nach E an. In den Abb. 4a und 4b wird die in der Meteorologie übliche Definition der Windrichtung benutzt, d.h., das Symbol E meint einen Ostwind, also einen aus Osten kommenden Wind. Es ist üblich, West- und Südwinde mit positivem Vorzeichen zu versehen.

Betrachten wir die Windverhältnisse im Höhenbereich von 70 km bis 110 km im Detail: Abb. 4a gibt den zonalen Grundwind wieder. Das Bild wird dominiert durch das sommerliche mesosphärische Ostwindssystem mit Geschwindigkeiten bis zu 45 m/s in 80 km Höhe und einer oberen Grenze bei etwa 92 km und dem darüberliegenden Westwindssystem. Die Änderungen in Windrichtung und Vorzeichen des vertikalen Gradienten in den Äquinoktien sind typisch für die Zirkulation in diesen Höhen. Das Hinaufreichen des sommerlichen Ostwindbereiches im Frühjahr bis in Höhen von annähernd 110 km Höhe ist in den einzelnen Jahren in der Regel besser ausgeprägt, als die mit der thermosphärischen Zirkulation verknüpfte Ostwindperiode im Herbst. In 100 km Höhe sieht der Beobachter den in früheren Jahren von vielen Autoren immer wieder hervorgehobenen Jahresgang des Windes mit Westwind im Sommer und Winter und meist sehr scharf begrenzten Ostwindperioden im Frühjahr und Herbst, wobei die vordere Flanke des herbstlichen Ostwindbandes eine bemerkenswert kalenderfeste Ausbildung aufweist.

Abb. 4b zeigt für den meridionalen Grundwind einen weitaus einfacheren vertikalen Aufbau. Im Sommer liegt die Grenze zwischen Südwind (unten) und Nordwind (oben) bei etwa 85 km, im Winter kann der Südwind, unterschiedlich in den einzelnen Jahren, bis über 100 km hinaufreichen. Die Geschwindigkeiten sind in derselben Höhe meist sehr viel geringer, als in der Zonalkomponente. Meridionale Windkomponenten sind besonders im Hinblick auf die Abschätzung der großräumigen Vertikalbewegung von Interesse. Die am GOC verwendete Meßmethode gestattet keine Bestimmungen von Vertikalbewegungen.

Abb. 4c liefert mit der zonalen Phasenposition der halbtägigen Gezeitenkomponente eine Darstellung, die mit den sehr schnellen Phasenänderungen in den Äquinoktien Zusammenhänge mit dem Temperaturfeld in der Anregungszone (Stratosphäre) deutlich

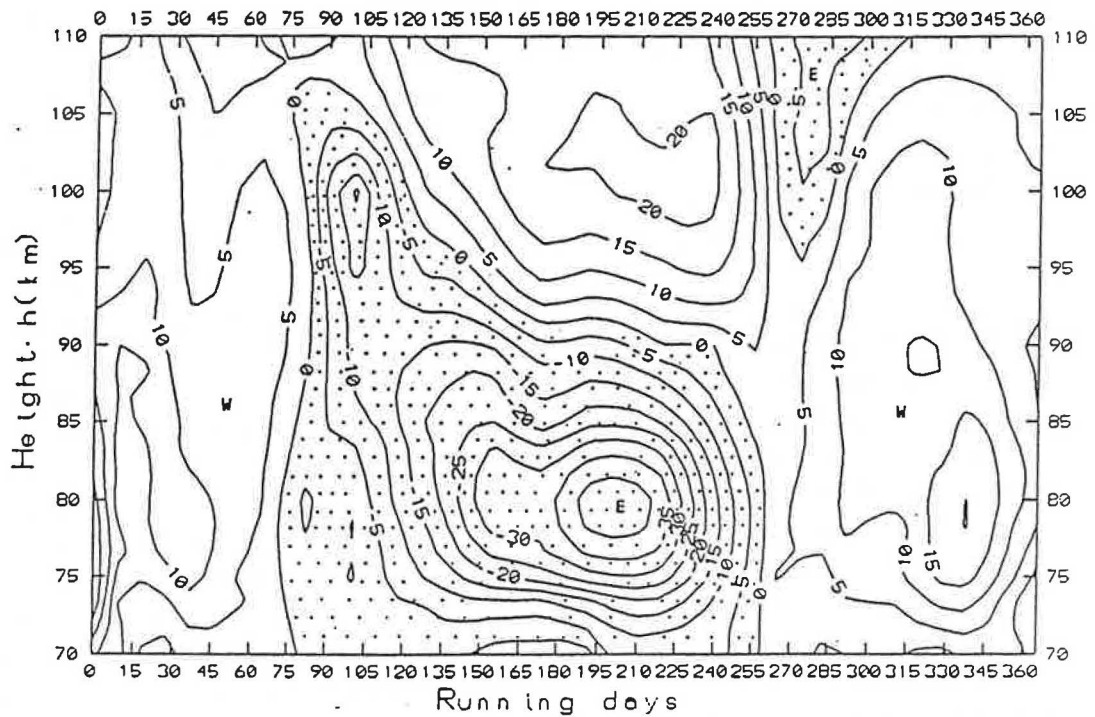
Zonal Winds  $v$ (m/s) from LF/MF Radars 1992

Abb. 4a: Höhen-Zeit-Schnitt für den zonalen Grundwind

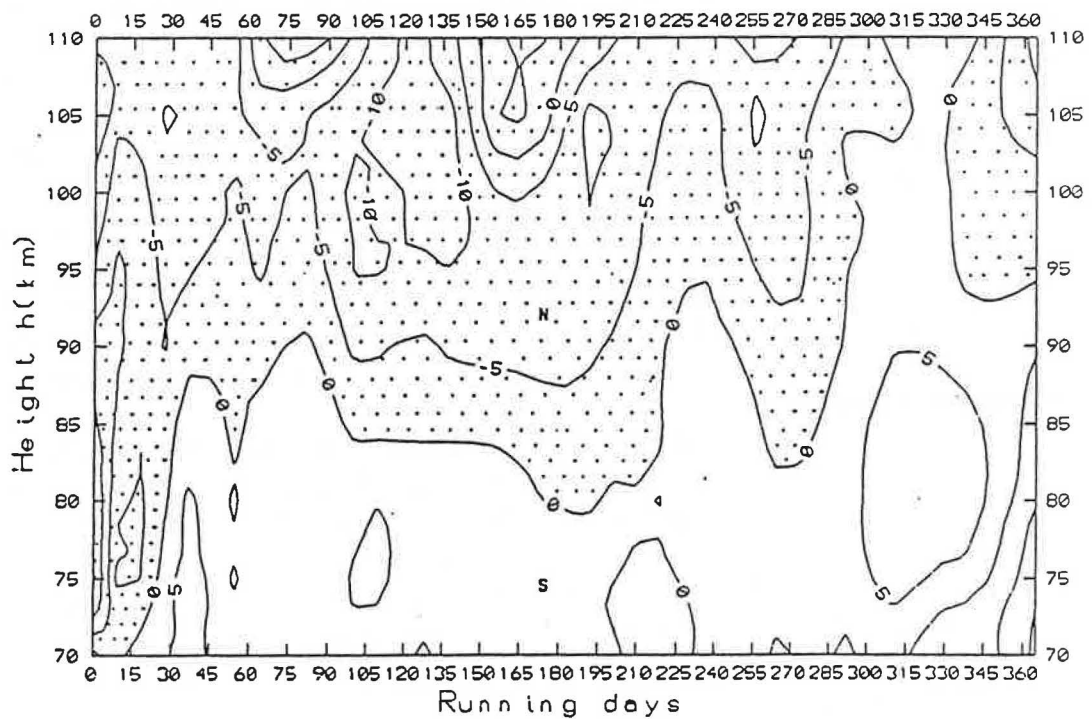
Meridional Winds  $v$ (m/s) from LF/MF Radars 1992

Abb. 4b: Höhen-Zeit-Schnitt für den meridionalen Grundwind

12h Tide (Phase, LMT) from LF/MF Radars 1992

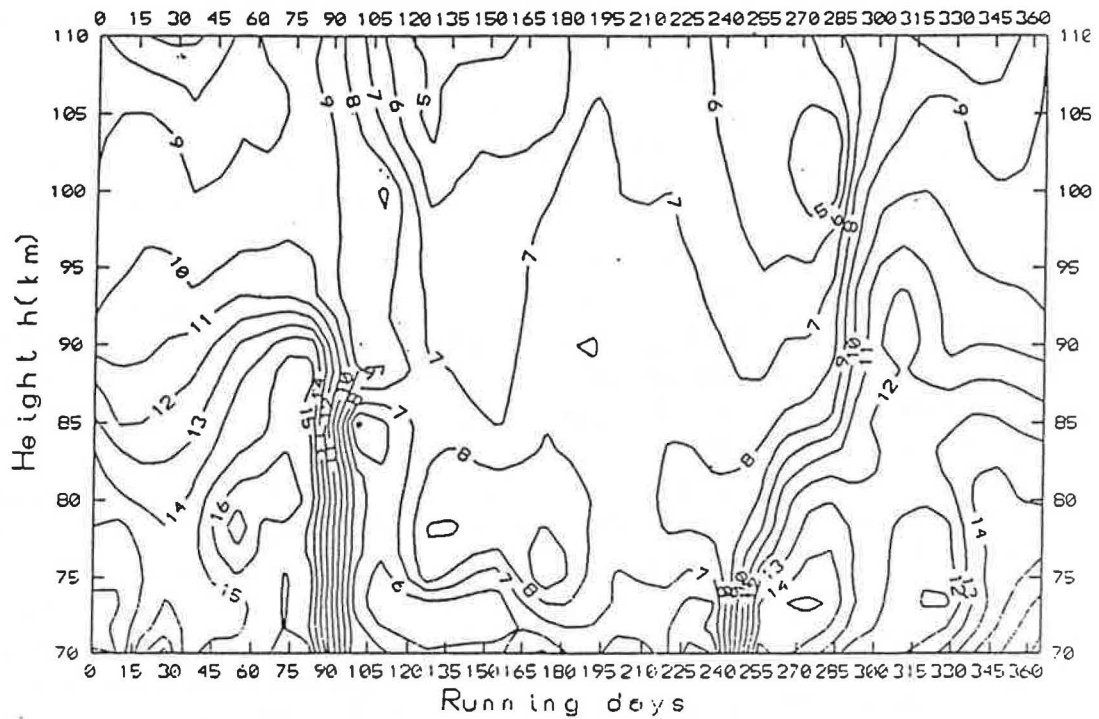


Abb. 4c: Höhen-Zeit-Schnitt für den Zeitpunkt des Maximums des ostwärts gerichteten halbtägigen Gezeitenwindes

12h Tide (Amplitude, m/s), LF/MF Radars 1992

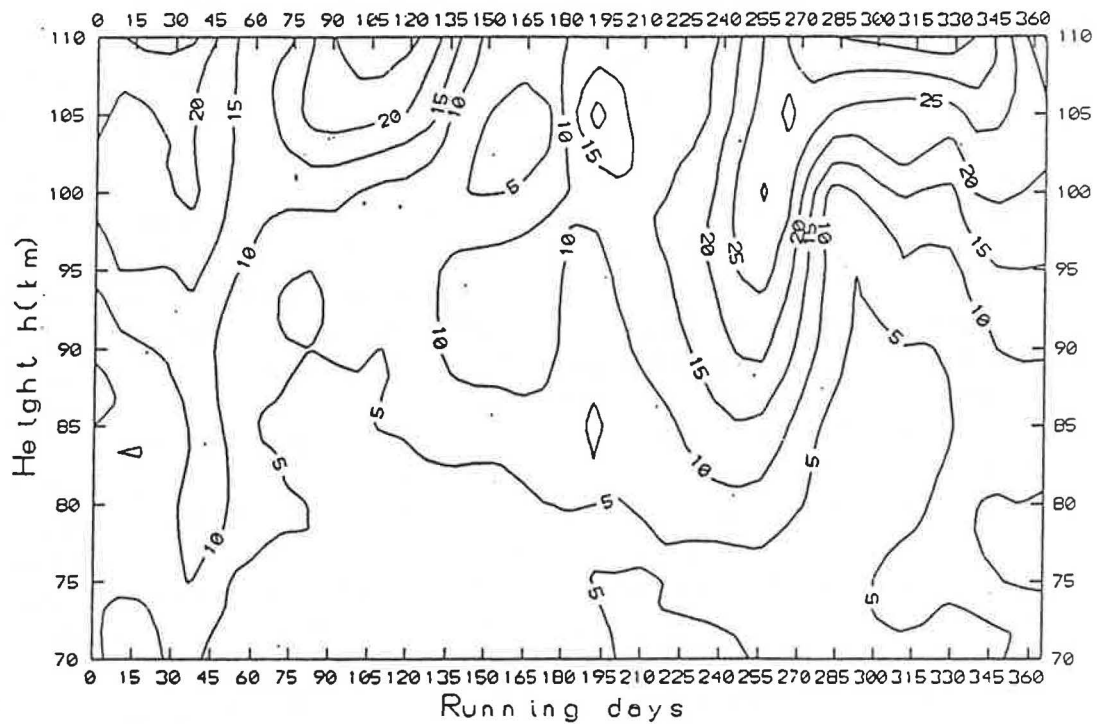


Abb. 4d: Höhen-Zeit-Schnitt für die zonale bzw. meridionale Amplitudenkomponente des halbtägigen Gezeitenwindes



macht. Aus der Phasenänderung mit der Höhe läßt sich die vertikale Wellenlänge abschätzen. Betrachtet man den rechten Bildrand, so erkennt man, daß das ostwärtige Maximum des halbtägigen Gezeitenwindes in 80 km Höhe bei 14 LMT und in 105 km Höhe bei 9 LMT liegt. Die vertikale Wellenlänge einer 12-Stunden-Welle beträgt demnach 60 km. Die Amplitude des halbtägigen Gezeitenwindes (Abb. 4d) steigt im Mittel mit der Höhe an und zeigt in festen Höhen ebenfalls charakteristische Jahresgänge.

Die Auswirkungen von Stratosphärenerwärmungen, die bei major events in unserem Höhenbereich in einer Umkehr der zonalen Grundwindrichtung und manchmal in der Vergrößerung der Amplitude des halbtägigen Gezeitenwindes (einschließlich von Phasenänderungen, die Sommerbedingungen simulieren) bestehen, können in dem Maßstab der Abb. 4 a-d nicht abgebildet werden. Dasselbe trifft auf die quasi-zweitägige Welle zu, die ihr Maximum vom 20. Juli bis 10. August jeden Jahres hat, teilweise aber über diesen Zeitraum auch hinaus geht. Ein zweites schwächeres Maximum dieser wohl ganzjährig vorhandenen Oscillation wird mitunter im Januar beobachtet. Bei der Separation von Grund- und Gezeitenwind bleibt dieser Anteil im Grundwind und führt dort, im Maßstab der Abbildungen ebenfalls nicht darstellbar, zu Tag-zu-Tag-Schwankungen der Grundwindgeschwindigkeiten. 1992 dauerte die Periode des Auftretens einer stärkeren 2-Tage-Welle vom 25.7. - 15.8., die Amplitude der rechtszirkular polarisierten Wellen betrug in 95 km Höhe im Mittel 10 m/s und das ostwärtige Maximum trat an den geradzahligen Julitagen gegen 10 LMT auf.

## 6. Ausblick

Die am GOC vervollkommnete D1-Methode in ihrer Anwendung im Langwellenbereich mit "closely spaced receiver"-Aufstellung und Auswertung nach einer modifizierten Form der "similar fades" - Methode zur Überwachung des Windfeldes an der Obergrenze des meteorologisch noch interessanten Höhenbereiches um 100 km zeichnet sich durch ein besonders gutes Verhältnis von Aufwand zu Nutzen aus. Das hat mehrere Gründe, die alle in dieselbe Richtung wirken: Das Verfahren kann auf fremde Sender zurückgreifen, die, regional unterschiedlich, in den entwickelten Ländern der alten Welt in hinreichender Dichte vorhanden sind und deren Erhalt und Unterhalt bisher von den Ländern garantiert worden ist. Der Investitionsaufwand ist, auch im Hinblick auf die in Anspruch genommene Fläche und die baulichen Anlagen, sehr gering. Das Verfahren selbst ist relativ einfach und in hohem Maße zuverlässig automatisierbar. Der Begriff "Automatisierung" ist freilich verführerisch und muß richtig interpretiert werden. Ein Observatorium ist keine Knotenstelle der TELEKOM, die gebaut, geprüft, in Betrieb genommen und in größeren Abständen einer Revision unterzogen wird. Ein Observatorium lebt von der ständigen Weiterentwicklung seiner Anlagen und der Schöpfung neuer Ideen zu ihrer Realisierung, wobei ständig zwischen Innovation und notwendiger Homogenität im Meßmaterial ein sehr schwierig zu findender Kompromiß zu suchen ist. Unter Automatisierung kann man nur die notwendige Rationalisierung momentan nach einem festen Algorithmus ablaufender Meßprozesse verstehen, und auch hier ist die Robustheit der einzelnen Teile insbesondere gegenüber Störeinflüssen von außen (Netzausfälle, Gewitterstörungen, Überhitzungen durch Kühlausfall etc.) unterschiedlich zu bewerten.

Die Ergebnisse gestatten in zunehmendem Maße eine Erweiterung unserer Kenntnisse über die Windfeldverhältnisse in der Hochatmosphäre und auf dieser Basis die Über-

wachung der Zirkulation und der Gezeitenwindssysteme im Hinblick auf jahreszeitliche Abläufe, die einen Durchgriff in die Strato- und Troposphäre vermuten lassen, auf Störungen im Zusammenhang mit einschneidenden Änderungen beispielsweise im Temperaturfeld und im meridionalen Temperaturgradienten der Stratosphäre während der bereits genannten winterlichen Erwärmungen, und auf die Ableitung von Trends, die sich aus langen Zeitreihen unter Eliminierung des Einflusses des Sonnenfleckenzyklus ergeben könnten.

Das Verfahren kann annähernd mit der Radarmeteoromethode konkurrieren, sofern diese interferometrische Höhenbestimmungen einschließt und ist ihr im Hinblick auf die a priori gegebene Möglichkeit, beide horizontalen Windkomponenten in einem Raumvolumen zu messen, in der Regel überlegen (der Aufwand, zwei Radarmeteoranlagen so aufzustellen, daß sich die beiden Antennenkeulen orthogonal im selben Raumvolumen treffen, ist nur einmal zeitweise in Frankreich getrieben worden). Der Vorteil der Methode mit partiellen Reflexionen liegt in der Möglichkeit, momentane Höhen-Wind-Profile zu messen oder doch Mittelwerte aus zeitlich sehr benachbarten Meßzyklen zu gewinnen und bei entsprechendem Aufwand die vertikale Windkomponente zu messen. Die Stärke der MST-Radar-Anlagen (meist DOPPLER-Frequenzmessungen in Kombination mit der closely-spaced-receiver-Methode) liegt bei ganz unvergleichlich größerem Aufwand bei Messungen in der unteren Atmosphäre, so daß für die meisten Anlagen die Bezeichnung ST-Radar der Sache näher käme, und in der relativ einfachen Messung der vertikalen Windkomponente. Interne atmosphärische Schwerewellen, eine besondere Domäne der MST-Anlagen, sind mit unserer Methode bis in den Periodenbereich um 10 Minuten zu verfolgen, sofern die Empfangsanlagen so positioniert werden können, daß ein Reflexionspunktedreieck in der Größenordnung von 25 km Kathetenlänge entsteht. Der Aufbau einer solchen Anlage mit den Meßstationen GOC, Volkssternwarte Eilenburg und Schulsternwarte Radebeul unter Verwendung des Senders 177 kHz wurde in den siebziger Jahren einmal in Erwägung gezogen, unter dem Aspekt der abzusehenden Notwendigkeit, bei den begrenzten Möglichkeiten dann alle Kapazität auf dieses Projekt konzentrieren zu müssen, aber wieder aufgegeben.

Das Gebiet der Dynamik der Hochatmosphäre ist eines der wenigen aus der Palette der Arbeitsrichtungen, die vor Jahrzehnten einmal unter der Fahne der "Ionosphärenphysik" vereinigt waren, das überlebt und mit der Zeit an Bedeutung gewonnen hat. Selbst die Zeit der Raketen- und Satelliteneuphorie, die viele Stationen mit ausschließlich bodengebundenen Messungen nicht überdauert haben, konnten wir unbehelligt und mit Erfolg zur Weiterentwicklung unserer Anlagen und Ausrüstungen nutzen. Die Renaissance bodengebundener Messungen in den achtziger Jahren, geboren aus der Notwendigkeit zu sparen und aus den gewachsenen Möglichkeiten des remote sensing, am eindrucksvollsten dokumentiert in der Zunahme der MST-Radar-Anlagen, ging erfreulicherweise von den großen Forschungsnationen aus, so daß dem Trend die Todesfalle des Armeleutegeruchs erspart blieb. Es ist anzunehmen, daß in der Zukunft Raumforschungsmethoden und bodengebundene Messungen optimal zusammengeführt werden können, wobei auch traditionelle Verfahren, z. B. Windbeobachtungen an Leuchtenden Nachtwolken, wie jüngste Veröffentlichungen beweisen (GADSDEN & TAYLOR 1994), immer noch ihren Platz in einem sehr vielstimmigen Konzert behalten haben. Für kommerzielle Nutzungen im Rahmen eines internationalen Netzes für eine künftige Meteorologie der Hochatmosphäre werden freilich nur eine kleinere Anzahl zur systematischen und zumindest quasikontinuierlichen Messung geeigneter Verfahren infrage kommen, unter denen sich für den Oberrand des meteorologisch noch relevanten Höhenbereiches um 100 km auch die D1-Methode im LW-Bereich befinden könnte.

## Literaturverzeichnis

Das folgende Literaturverzeichnis umfaßt aus einer bis zu den Anfängen zum Thema hochatmosphärische Dynamik zurückgehenden Kartei, die annähernd 8 000 Zitate enthält (davon etwa 100 mit Arbeiten unter Beteiligung von Autoren aus dem GOC) und demnächst in ALLEGRO-C 11.2 auf Diskette zur Verfügung stehen wird, nur einige ausgewählte Arbeiten zu den im Text genannten Namen.

- |  |  |
|--|--|
| BERG,H.<br>1955/56                                 | Ionosphärenwinde.<br>Wiss. Z. Univ. Leipzig, Math.-Naturwiss.<br>Reihe, Heft 1/2, 213 - 218.   |
| BRIGGS,B.H.<br>PHILLIPS,G.J.<br>SHINN,D.H.<br>1950 | The analysis of observations on spaced<br>receivers of the fading of radio signals.<br>Proc. Phys. Soc. <b>B63</b> , 106 - 121.  |
| BURKE,M.J.<br>1976                                 | Validity of three-station methods of<br>determining ionospheric motions.<br>J. atmos. terr. Phys. <b>38</b> , 553 - 559.   |
| COSSART,G.v.<br>1976                               | Ein Beitrag zur synoptischen Untersuchung<br>der atmosphärischen Struktur in der Mesopausen-<br>region aus indirekten Phasenmessungen.<br>Inauguraldiss., AdW Berlin, 158 S. |
| FAUST,H.<br>1968                                   | Der Aufbau der Erdatmosphäre.<br>Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig, 308 S.   |
| GADSDEN,M.<br>TAYLOR,M.J.<br>1994                  | Anweisungen für die photographischen Aufnahmen<br>der Leuchtenden Nachtwolken - 103 years on.<br>J. atmos. terr. Phys. <b>56</b> , 447 - 459.                                |
| HOFFMANN,P.<br>1991                                | Bestimmung des Windfeldes im Höhenbereich<br>70 bis 90 km nach Messungen partieller Reflexionen<br>mit einem FM-CW Radar.<br>Inauguraldiss., Univ. Leipzig, 100 S.           |
| JONES,D.<br>MAUDE,A.D.<br>1972                     | Dispersive motions in the ionosphere.<br>J. atmos. terr. Phys. <b>34</b> , 1241 - 1259.  |
| KRAUTKRÄMER,J.<br>1950                             | Über Wanderungserscheinungen rascher<br>Feldstärkeschwankungen von Ionosphärenechoes.<br>Archiv Elektr. Übertr. <b>4</b> , 133 - 138.  |

- KÜRSCHNER,D.  
1972  
Untersuchungen über eine neue Meßmethode zur automatischen digitalen Bestimmung ionosphärischer Driftparameter.  
Inauguraldiss., Univ. Leipzig, 92 S.
- KÜRSCHNER,D.  
1981  
Methodical aspects and new tests for determining the reflection height of sky waves in the long-wave range at oblique incidence using amplitude-modulated long-wave transmitters.  
Gerlands Beitr. Geophys. 90, 285 - 294.
- KÜRSCHNER,D.  
1991  
Ein Beitrag zur statistischen Analyse hochatmosphärischer Winddaten aus bodengebundenen Messungen.  
Z. Meteorol. 41, 262 - 266.
- MERTA,R.  
1960  
Troposphärische Driftmessungen mit ultrakurzen Wellen und ihre meteorologische Deutung.  
Diplomarbeit, Geophys. Inst. Univ. Leipzig, 52 S.
- MITRA,S.N.  
1949  
A radio method of measuring winds in the ionosphere.  
Proc. Inst. Electr. Engrs. 96/III, 441 - 446.
- PHILLIPS,G.J.  
1955  
An apparatus for recording time-delays between radio fading characteristics.  
J. atmos. terr. Phys. 6, 124 - 128.
- PÜTTER,P.St.  
1955  
Messung des Ionosphärenwindes aus der Wanderungsgeschwindigkeit eines Zustandes (z.B. Echo-Feldstärke) längs der Erdoberfläche.  
In: Rep. Phys. Soc., Conf. The Physics of the Ionosphere, Cavendish Lab., Cambridge, 191 - 201.
- PAWSEY,J.L.  
1935  
Further investigations of the amplitude variations of downcoming wireless waves.  
Proc. Cambr. Phil. Soc. 31, 125 - 144.
- RATCLIFFE,J.A.  
PAWSEY,J.L.  
1933  
A study of the intensity variations of downcoming wireless waves  
Proc. Cambridge Phil. Soc. 29, 301 - 318.
- SCHERHAG,R.  
1952  
Die explosionsartigen Stratosphärenenerwärmungen des Spätwinters 1951/52.  
Ber. Dt. Wetterd. 6, 51 - 63.
- SCHMINDER,R.  
KÜRSCHNER,D.  
1990  
Winds and tides in the upper mesopause region over Central Europe in 1988  
Z. Meteorol. 40, 316 - 321.



SPRENGER, K.  
1958

Ionosphärendriftmessungen im Langwellenbereich  
als Beitrag zum Problem der allgemeinen Zirkulation  
der Hochatmosphäre  
Z. Meteorol. 12, 211 - 218.

### **Danksagung**

Diese Arbeit und die genannte ALLEGRO-Bibliographie zur Dynamik der Hochatmosphäre entstand mit Unterstützung durch eine Beihilfe im Rahmen des BMFT-Verbundprojektes 07KFT306 "Analyse, numerische Simulation und Vorhersage natürlicher und anthropogener Klimaveränderungen".